

# Anisotropie de la turbulence dans une couche limite sur couvert végétal

L. PIETRI<sup>a</sup>, M. AMIELH<sup>a</sup>, F. ANSELMET<sup>a,b</sup>, A. PETROFF<sup>c</sup>

a. Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre (IRPHE), Aix-Marseille Université, CNRS, Technopôle de Château-Gombert, 49 rue Joliot-Curie, BP 146, 13384 MARSEILLE cedex 13

b. Ecole Centrale Marseille, 38 rue Joliot-Curie, 13451 MARSEILLE cedex 20

c. Department of Chemistry, University of Toronto, 80 St George Street, M5S3H6, TORONTO, CANADA

## Résumé :

L'analogie de couche de mélange est un résultat classique des écoulements sur des couverts végétaux denses et homogènes. Quand le couvert devient épars, on passe d'un écoulement de couche de mélange à celui d'une couche limite perturbée. Afin de caractériser finement cette transition, des mesures des trois composantes de la vitesse sont réalisées au sein de couverts de différentes densités. Le but du travail est de déterminer toutes les composantes du tenseur de Reynolds en écoulement de couvert afin d'analyser comment cette transition se traduit sur le diagramme de Lumley.

## Abstract :

The mixing layer analogy is a standard result for flows over homogeneous and dense vegetation covers. When the canopy becomes sparse, progressive switching from a mixing layer flow to a disturbed boundary layer is observed. To accurately characterize this transition, three-component velocity measurements are performed for different cover densities. The aim of this work is to determine all components of the Reynolds stress tensor for cover flows and to analyze how this transition is reflected in the Lumley diagram.

**Mots clefs :** analogie de couche de mélange, turbulence, anisotropie

**Key-words :** mixing layer analogy, turbulence, anisotropy

## 1 Introduction

### 1.1 Analogie de couche de mélange

Résultat classique des écoulements sur couvert végétal [1,2], l'analogie de couche de mélange n'est valable que pour des couverts végétaux denses. Bien que ces écoulements dits de couvert aient été largement étudiés par le passé [1], peu de travaux ont été consacrés à l'interaction d'un écoulement turbulent avec un couvert épars. La transition de l'analogie de couche de mélange vers un écoulement classique de couche limite lorsque le couvert devient de moins en moins dense demande ainsi à être plus finement analysée et comprise. Un des paramètres caractéristiques de cette transition est le produit  $c_d a h$  où  $c_d$  est le coefficient de traînée du couvert,  $a$  sa densité de surface foliaire et  $h$  la hauteur du couvert [3,4]. Pour une valeur de  $c_d a h$  inférieure à 0.04, l'écoulement peut être considéré comme étant une couche limite turbulente classique, sans point d'inflexion dans le profil de vitesses [4]. Pour une valeur supérieure à 0.1, alors le point d'inflexion apparaît de manière très prononcée dans le profil de vitesses, impliquant la validité de l'analogie de couche de mélange [4].

### 1.2 Anisotropie de la turbulence

L'état d'anisotropie d'un écoulement turbulent peut être caractérisé en introduisant deux variables  $\eta$  et  $\zeta$  liées aux invariants du tenseur d'anisotropie [5, 6],  $b_{ij} = \frac{\overline{u_i' u_j'}}{k} - \frac{2}{3} \delta_{ij}$ , où les  $\overline{u_i' u_j'}$  sont les tensions de Reynolds

et  $k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'}$  désigne l'énergie cinétique de la turbulence. Si on considère le tenseur d'anisotropie  $b_{ij}$ , sa trace (et donc son premier invariant) est nulle par construction puisque ce tenseur sert à quantifier les écarts par rapport à l'isotropie (qui implique que les trois variances des fluctuations de vitesse sont égales à  $\frac{2}{3}k$ ). Les deux autres invariants principaux notés  $II_b$  et  $III_b$  sont déterminés à partir des valeurs propres du tenseur  $b_{ij}$  :

$$b_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\overline{u'^2}}{k} - \frac{2}{3} & \frac{\overline{u'v'}}{k} & \frac{\overline{u'w'}}{k} \\ \frac{\overline{u'v'}}{k} & \frac{\overline{v'^2}}{k} - \frac{2}{3} & \frac{\overline{v'w'}}{k} \\ \frac{\overline{u'w'}}{k} & \frac{\overline{v'w'}}{k} & \frac{\overline{w'^2}}{k} - \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Les paramètres  $\eta$  et  $\zeta$ , sont alors calculées de la manière suivante à partir de  $II_b$  et  $III_b$  :

$$\begin{cases} 6\eta^2 = -2.II_b \\ 6\zeta^3 = 3.III_b \end{cases} \quad (2)$$

La carte des invariants d'anisotropie est tracée dans le plan  $(-II_b, III_b)$ , ou  $(-II_a, III_a)$  pour lequel on utilise le tenseur  $a_{ij} = b_{ij}/2$  à la place de  $b_{ij}$  (figure 1). Cette carte permet de qualifier l'anisotropie d'écoulements de référence (couche de mélange, couche limite, ...). A l'intérieur du diagramme, on retrouve les écoulements totalement anisotropes. Sur les deux branches latérales, on a des états axisymétriques de la turbulence, dont les écoulements « standards » de jets et couches limites d'une part, de couches de mélange d'autre part, se trouvent être très proches : axisymétrie en cigare pour les premiers, avec  $III_a > 0$  (ce qui correspond à un état de la turbulence où une des trois variances est significativement plus forte que les deux autres, qui sont égales), et axisymétrie en disque pour les seconds, avec  $III_a < 0$  (ce qui correspond à un état de la turbulence où deux des trois variances sont égales et plus fortes que la troisième) [7].

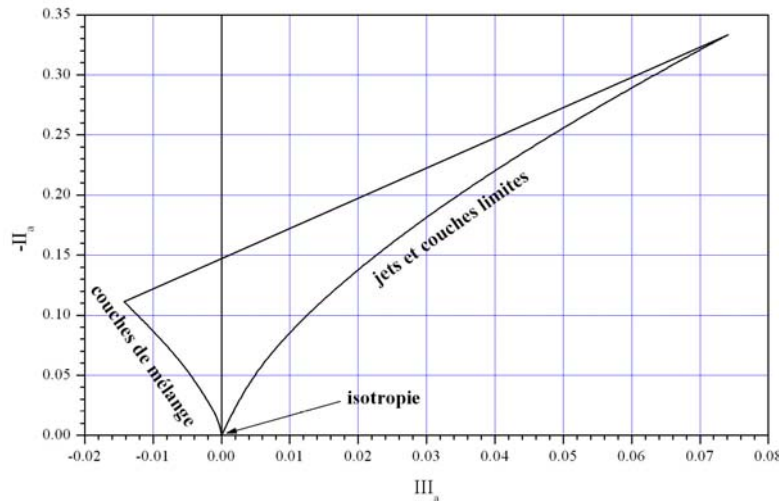


FIG. 1 – Carte des invariants d'anisotropie ou diagramme de Lumley

Pour une couche limite turbulente sur paroi lisse et plane, les points correspondant à la zone de proche paroi se retrouvent du côté de l'extrémité de la branche ( $III_a > 0.04$ ) alors que les points correspondant à la région proche de la frontière extérieure sont très proches de l'origine ( $III_a < 0.01$ ) [8].

Cette analyse permet parfois de tester des modélisations de la turbulence, en s'assurant que les quantités calculées se situent bien à l'intérieur des branches du diagramme de Lumley ([9] par exemple), ou pour tester différentes approximations qui peuvent servir à déterminer expérimentalement le taux de dissipation moyen  $\varepsilon$ , en se basant sur les propriétés d'axisymétrie de la turbulence [8].

### 1.3 Anisotropie et écoulement de couvert

L'idée est d'utiliser le diagramme de Lumley afin de positionner les différents écoulements de couvert pour lesquels le champ de vitesses a été complètement qualifié. On peut penser que les écoulements sur couverts denses, assimilables à une couche de mélange, se situeront sur la branche du diagramme relative à la couche de mélange et que ceux sur couverts plus épars seront regroupés le long de la branche de couche limite (figure 1). Le but est ensuite de caractériser finement la transition entre les deux types d'écoulement afin, notamment, de déterminer les paramètres les plus influents sur cette transition (entre la densité de surface foliaire, l'écartement entre deux arbres voisins, la répartition au sol des arbres, alignés ou en quinconce, ...).

Dans un premier temps, des mesures de vitesse réalisées en écoulement de couvert extraites de la littérature sont exploitées afin d'avoir une première indication sur l'état d'anisotropie de ces écoulements en fonction de la densité de couvert. Dans un deuxième temps, un couvert végétal artificiel dont on peut faire varier la densité est placé en soufflerie. Une technique de mesure des trois composantes de la vitesse sera mise en place afin d'obtenir le tenseur complet de Reynolds.

## 2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est décrit dans [10]. On rappellera ici brièvement les principaux détails.

### 2.1 Couvert végétal

Le travail expérimental est développé en soufflerie (longueur 15 m). La veine d'essais, de 5 m de long, a une section rectangulaire ( $0.46 \times 0.56 \text{ m}^2$ ). La pente du plancher est ajustable afin de maintenir, si nécessaire, un gradient de pression nul dans la veine. Des trous régulièrement espacés ont été percés dans le plancher afin d'y planter les éléments du couvert. Celui-ci couvre une surface de  $2 \times 0.56 \text{ m}^2$ .

Le couvert est composé d'un nombre variable d'arbres artificiels (figure 2). La hauteur moyenne  $h$  des arbres est de 0.05 m. Le rapport de cette hauteur à celle de la veine est de 1:9. Tronc et branches sont métalliques ; le feuillage est composé d'une fine mousse verte. Les arbres sont disposés au sol soit de manière alignée, soit en quinconce. La densité de rugosité  $\lambda$  du couvert, définie comme étant la surface frontale par unité de surface au sol, dépend du type d'arbre, de leur espacement moyen et de la disposition au sol. L'espacement  $\Delta$ , rapporté à la hauteur  $h$ , varie de 1 à 2 alors que  $\lambda$  varie de 0.5 à 0.05.

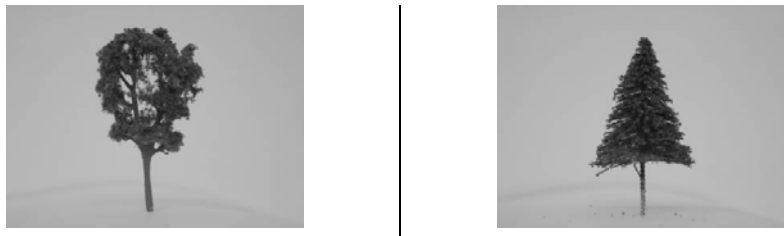


FIG. 2 – Éléments du couvert artificiel

### 2.2 Technique de mesure

La mesure de vitesse est réalisée par vélocimétrie laser Doppler (VLD), technique la plus adaptée à des écoulements à fortes intensités de turbulence. En effet, celles-ci peuvent largement dépasser 30% à l'intérieur du couvert. Des mesures complémentaires ont également été effectuées par PIV (vélocimétrie par images de particules). Les parois de la veine d'essai ont été peintes en noir pour minimiser les réflexions. L'ensemencement est constitué de gouttelettes d'huile d'olive dont le diamètre est de l'ordre du micromètre. Deux systèmes sont utilisés. Le premier mesure deux composantes de la vitesse (longitudinale  $U$  et verticale  $W$ ), le second une seule composante. Dans une première phase, présentée ici, seules les composantes  $U$  et  $W$  ont été mesurées.

Pour caractériser complètement le tenseur de Reynolds, les deux systèmes seront couplés. Après s'être assuré de la bonne superposition des deux volumes de mesure créés, une série d'essais permettra de déterminer le nombre de bouffées Doppler nécessaires pour obtenir une bonne convergence de l'ensemble des moments d'ordre 2 relatifs aux trois composantes de la vitesse.

### 3 Quelques caractéristiques d'un écoulement de couvert

On rappelle ici quelques caractéristiques des écoulements de couvert.

#### 3.1 Champ moyen

Les écoulements de couvert sont caractérisés par la présence d'un point d'inflexion dans le profil vertical de la vitesse moyenne  $U/U_h$  où  $U$  est la composante longitudinale et  $U_h$  est la vitesse moyenne à la hauteur  $h$  du couvert [2]. Un fort cisaillement existe, plus ou moins important en fonction de la densité de rugosité du couvert ou de l'arrangement au sol de celui-ci (figure 3).

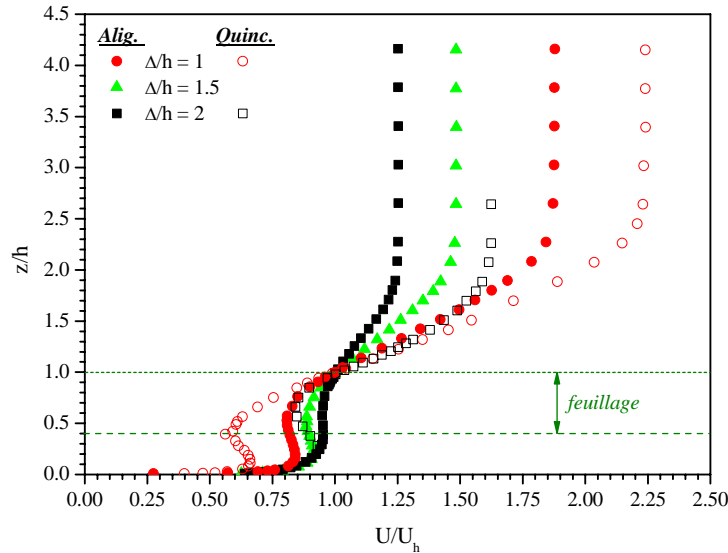


FIG. 3 – Profil vertical de la vitesse moyenne (composante longitudinale) pour trois espacements et deux arrangements au sol (symbole plein : alignement / symbole creux : quinconce),  $z$  la coordonnée verticale

#### 3.2 Sensibilité au facteur de dissymétrie

On définit le facteur de dissymétrie, noté  $S_u$ , de la composante longitudinale de la vitesse par :

$$S_u = \frac{\overline{u'^3}}{\overline{u'^2}^{3/2}} \quad (3)$$

Le facteur de dissymétrie est un paramètre très sensible au type d'écoulement. Il est négatif si l'écoulement est une couche limite turbulente et positif dans une couche de mélange. On montre qu'il est nettement positif dans la zone de feuillage lorsque le cisaillement est fort en  $z = h$ . Lorsque le cisaillement devient plus faible,  $S_u$  tend vers zéro pour devenir ensuite négatif (figure 4). Au-dessus du feuillage, les différentes évolutions sont essentiellement pilotées par l'épaisseur de la couche limite  $\delta$ . Moins grand est le rapport  $\delta/h$  (pour nos expériences, ce rapport vaut à peu près 2), plus fortement les données pour  $z/h > 1$  tendent vers des valeurs très négatives qui sont caractéristiques de l'intermittence de frontière dans les régions extérieures de la couche limite. Le facteur de dissymétrie n'est donc pas un indicateur très pertinent pour analyser les propriétés de la turbulence au-dessus du couvert puisque c'est l'influence de la valeur de  $\delta/h$  qui est alors déterminante, comme le montre clairement la comparaison avec les données de Green et al. [11] en couvert naturel pour lesquelles  $\delta/h \gg 1$ .

### 4 Etat d'anisotropie des écoulements de couvert

Une étude préalable de l'état d'anisotropie des écoulements de couvert (figure 5) a été réalisée à partir de données de la littérature. Malheureusement, il existe peu de résultats permettant de caractériser complètement le tenseur d'anisotropie.

L'article de Nowak et al. [13] ne fournit que les écart-types des trois composantes et le moment croisé entre

la composante longitudinale et la composante verticale de la vitesse dans trois cas de forêt naturelle et dans un cas de couvert artificiel. Pour calculer une première estimation des invariants du tenseur d'anisotropie, les deux autres moments croisés entre les composantes de la vitesse ont été supposés nuls de manière arbitraire. Seuls les résultats de leurs travaux obtenus en soufflerie appartiennent au diagramme. Ceux obtenus en forêt sortent des limites du diagramme, soulignant ainsi l'incohérence de cette hypothèse.

Dunn et al. [14] ont mesuré les trois composantes de la vitesse et calculé tous les moments d'ordre 2 pour un couvert artificiel, rigide ou flexible, et pour différents espacements entre les éléments de couvert. Les résultats obtenus suivent la branche asymptotique caractérisant l'anisotropie des couches limites. Seul le cas le plus dense montre un comportement analogue à une couche de mélange pour les mesures réalisées à l'intérieur même du couvert. Cela conforte l'hypothèse d'analogie de couche de mélange pour des couverts très denses (ici  $\Delta/h = 0.65$ ).

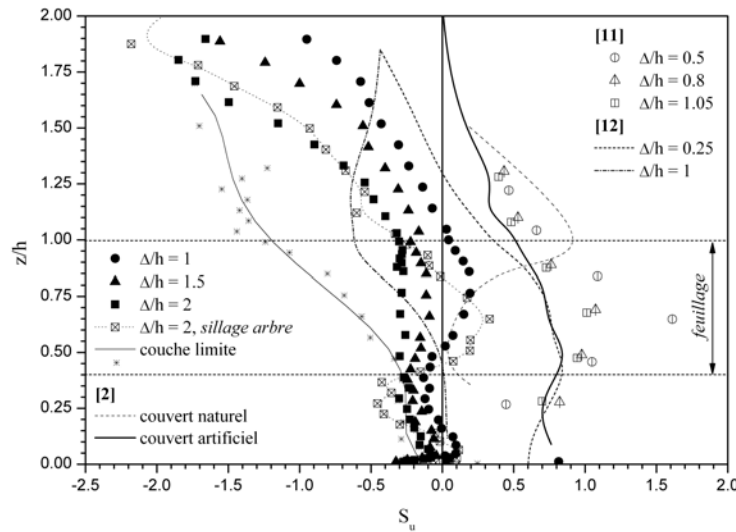


FIG. 4 – Facteurs de dissymétrie des fluctuations de vitesse longitudinale) pour trois espacements et deux arrangements au sol (symbole plein : alignement / symbole creux : quinconce),  $z$  la coordonnée verticale. Comparaison avec Finnigan [2], Green et al. [11] en couvert naturel et Poggi et al. [12] en couvert artificiel

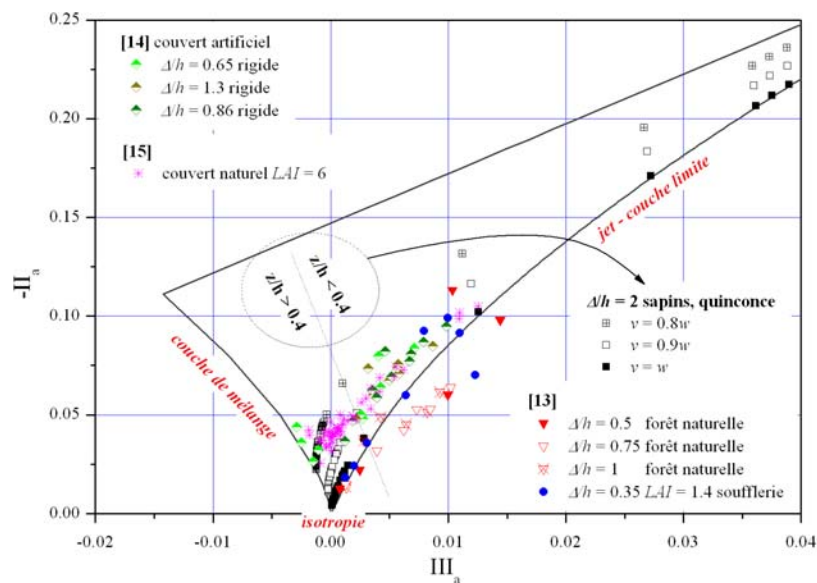


FIG. 5 – Carte des invariants d'anisotropie pour quelques écoulements de couvert ( $LAI \approx 2\lambda$ )

Murphy et al. [15] ont mesuré les trois composantes de la vitesse en  $z/h = 1.4$  au-dessus d'une forêt de

feuillus d'indice de surface foliaire  $LAI$  ( $\approx 2\lambda$ ) égal à 6, ce qui caractérise un couvert dense. Tous les termes du tenseur d'anisotropie ont pu être calculés pour diverses conditions de vent. Seuls sont présentés des résultats relatifs à une condition de neutralité de l'atmosphère. Une certaine dispersion est constatée et reste à éclaircir.

A ces résultats expérimentaux ont été ajoutés ceux tirés de mesures des deux composantes de la vitesse (longitudinale et verticale) par PIV pour un couvert épars de sapins artificiels en soufflerie (cf. §2). En faisant varier le rapport entre l'écart-type de la composante transversale  $v$  (non mesurée ici) et celui de la composante verticale  $w$  (notés par simplicité  $v$  et  $w$  sur la figure), on montre que l'on peut passer d'une branche à l'autre du diagramme (pour les points situés à  $z/h > 0.4$ ) alors que, pour les points situés à  $z/h < 0.4$ , on s'écarte nettement de la limite axisymétrique lorsque  $v$  diffère fortement de  $w$  ( $v=0.8 w$ ). Il est donc absolument essentiel de mesurer avec le plus grand soin les fluctuations des trois composantes de vitesse. Néanmoins, par comparaison avec les résultats de la figure 4, l'influence de la valeur de  $\delta/h$ , selon que les mesures sont obtenues en soufflerie ou en site naturel, n'est pas visible.

## 5 Conclusion

Il apparaît clairement de cette première étude qu'il est absolument nécessaire de mesurer non seulement les trois composantes de la vitesse, mais aussi de calculer les différents moments croisés entre celles-ci. Pour cette raison, un système de mesure simultanée des trois composantes de la vitesse par vélocimétrie laser Doppler est en cours de mise au point. L'analyse approfondie de l'état d'anisotropie de l'écoulement à l'aide du diagramme de Lumley devrait permettre de mieux qualifier la transition vers l'analogie de couche de mélange lorsque le couvert végétal étudié devient plus dense, tout en permettant une bonne comparaison entre les mesures effectuées en laboratoire et en site naturel et la mise à disposition d'éléments tangibles pour le développement de modélisation de ces écoulements complexes de couvert.

## References

- [1] Raupach M.R., Finnigan J.J., Brunet Y., Coherent eddies in vegetation canopies: the mixing layer analogy, *Boundary-Layer Meteorol.* 78 (3-4), 351-382, 1996.
- [2] Finnigan J.J., Turbulence in plant canopies, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 32, 519-571, 2000.
- [3] Massman W.J., A comparative study of some mathematical models of the mean wind structure and aerodynamic drag of plant canopies, *Boundary-Layer Meteorol.* 40 (1-2), 179-197, 1987.
- [4] Nepf H., Ghisalberti M., White B., Murphy E., Retention time and dispersion associated with submerged aquatic canopies, *Water Resour. Res.* 43 (4), W0422, doi: 10.1029/2006WR005362, 2007
- [5] Lumley J.L., Computational modeling of turbulent flows. *Adv. Appl. Mech.* 18, 123-176, 1978.
- [6] Pope S. B., *Turbulent flows*, Cambridge University Press, 2000.
- [7] Chassaing P., *Turbulence en mécanique des fluides*, Cépaduès Editions, 2000.
- [8] Antonia R.A., Kim J., Browne L.W.B., Some characteristics of small-scale turbulence in a turbulent duct flow. *J. Fluid Mech.* 233, 369-388, 1991.
- [9] Speziale C.G., Sarkar S., Gatski T.B., Modeling of pressure-strain correlation of turbulence: An invariant dynamical system approach. *J. Fluid Mech.* 227, 245-272, 1991.
- [10] Pietri L., Petroff A., Amielh M., Anselmet F., Turbulence characteristics within sparse and dense canopies. *Environ. Fluid Mech.* 9 (3), 297-320, 2009.
- [11] Green S.R., Grace J., Hutchings N.J., Observations of turbulent air flow in three stands of widely spaced Sitka spruce. *Agric. Meteorol.* 74 (3-4), 205-225, 1995.
- [12] Poggi D., Porporato A., Ridolfi L., Albertson J.D., Katul G.G., The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence. *Boundary-Layer Meteorol.* 111(3), 565-587, 2004.
- [13] Nowak M.D., Warland J.S., Orchansky A.L., Ketler R., Green S., Wind tunnel and field measurements of turbulent flow in forests. Part I: Uniformly thinned stands. *Boundary-Layer Meteorol.* 95 (3), 457-495, 2000.
- [14] Dunn C., Lopez F. Garcia M., Mean flow and turbulence in a laboratory channel with simulated vegetation, *Hydraulic Engineering Series 51*, University of Illinois, Urbana, Illinois, 1996.
- [15] Murphy J.G., Geddes J.A., Petroff A., de Sousa A., Ellis R.A., Thomas S.C., Monitoring carbon, nitrogen, and particulate matter exchange in a northern hardwood forest subject to high N deposition. *American Meteorological Society*, Boulder, CO, USA, 2010.